

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-4-289-297

УДК 624.012.4:620.179:005.584.1

Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона

Канд. техн. наук, доц. Д. Ю. Снежков¹⁾, докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Существующая система неразрушающего контроля бетона конструкций фактически ориентирована на использование продольных акустических волн. Это обусловлено простотой технической реализации измерений скорости (времени) прохождения акустического импульса в бетонном массиве. Но обратной стороной простой методики измерений является потеря дополнительной информации о бетоне, которая содержится в принятом акустическом сигнале. Поэтому применение ультразвукового метода контроля бетона ограничивается оценкой его прочности. Совместное использование нескольких типов волн – так называемый мультиволновой контроль – позволяет улучшить метрологические показатели ультразвукового метода и получить больше информации при определении физико-механических свойств бетона в лабораторных и натурных условиях. В статье рассматривается испытание бетона протяженных элементов и конструкций ультразвуковым импульсным методом на основе использования продольных подповерхностных волн и волн Релея. Для типовых акустических преобразователей со значительным временем реверберации и не обладающих пространственной селективностью предлагается методика временной селекции волновых составляющих по амплитудному признаку. Основа методики – визуальное (по осциллограмме принятого сигнала) определение характеристических моментов времени, по которым рассчитывается дифференциальное значение скорости распространения импульса волны Релея. Представлены результаты моделирования процесса распространения акустического импульса на базе 0,15 м и данные ультразвуковых натурных испытаний бетона на измерительных базах от 0,25 до 1,75 м. Преимущество использования большой базы прозвучивания – возможность выполнения сплошного контроля поверхности крупноразмерных элементов и конструкций, а не выборочного в отдельных зонах контроля, как это предусмотрено действующими нормативами. Чувствительность параметров волны Релея к приповерхностным дефектам бетона позволит оперативно выявлять участки трещиноватости железобетонной конструкции. Локализация энергии поверхностной волны в слое толщиной $\lambda/2$ – λ при соответствующем выборе частоты колебаний даст возможность не учитывать присутствие арматуры. Кроме этого, большая база измерений позволяет снизить влияние структурной неоднородности бетона на статистическую устойчивость оценки скорости импульса, что в перспективе открывает возможность регистрировать проявление эффекта акустической упругости бетона конструкций в натурных условиях.

Ключевые слова: контроль бетона, упругие модули, ультразвуковой метод, мультиволновой контроль, волна Релея, корреляция

Для цитирования: Снежков, Д. Ю. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 4. С. 289–297. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-4-289-297

Multi-Wave Ultrasonic Control of Concrete

D. Yu. Snezgov¹⁾, S. N. Leonovich¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The existing non-destructive testing system of structure concrete is actually orientated on the usage of longitudinal acoustical waves. This is due to simplicity of technical realization for measuring velocity (time) of acoustical pulse propagation in bulk concrete. But a reverse side of simple measuring procedure is a loss of additional information on concrete which

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-96-76
leonovichsn@tut.by

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-96-76
leonovichsn@tut.by

is contained in the accepted acoustical signal. Therefore usage of an ultrasonic concrete testing method is limited by assessment of its strength. Joint usage of several wave types, so-called multi-wave testing, allows to refine metrology parameters of the ultrasonic method and to gain more information while determining physical and mechanical properties of concrete in laboratory and in situ conditions. The paper considers testing of elongated concrete elements and structures by an ultrasonic pulsing method on the basis of longitudinal subsurface and Rayleigh waves. It has been proposed to use methodology for time selection of wave components according to amplitude parameter and it has been applied for standard acoustical transformers with considerable reverberation time and not possessing spatial selectivity. Basic principle of the proposed methodology is visual (according to oscillogram of the received signal) determination of characteristic time moments which are used for calculation of differential value of a propagation velocity in the Rayleigh wave impulse. The paper presents results pertaining to simulation of acoustical pulse propagation on the basis of 0.15 m and data of concrete ultrasonic in situ testing on measuring bases from 0.25 to 1.75 m. Advantage of large baseline for sonic test is a possibility for execution of a hundred percent inspection for surface of large-sized elements and structures, and so there is no need to make a selective inspection in some control areas as it is stipulated by provided by existing regulations. Responsivity of the Rayleigh wave parameters to near surface concrete defects permits quickly and efficiently to detect crack areas in a reinforced structure. Energy localization of a surface wave in a layer having width $\lambda/2-\lambda$ provides a possibility to ignore reinforcement availability under appropriate selection of oscillation frequency. In addition to this, large measuring baseline makes it possible to lower effect of concrete structural inhomogeneity on statistical stability for pulse velocity assessment that ultimately reveals a possibility to register an appearance of concrete acoustical elasticity effect under in situ conditions.

Keywords: concrete control, elastic modules, ultrasound method, multi-wave testing, Rayleigh wave, correlation

For citation: Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2017) Multi-Wave Ultrasonic Control of Concrete. *Science and Technique*. 16 (4), 289–297. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-4-289-297 (in Russian)

Введение

Прочность является показателем предельного состояния бетона как конструкционного материала, но она не может служить исчерпывающей характеристикой его деформационных свойств, которые для расчетов железобетонных конструкций, их совместной работы играют не меньшую роль, чем прочность бетона. В настоящее время ни в отечественных нормативах, ни в нормативах стран СНГ, ни в стандартах Евросоюза вопросы определения упругодеформативных свойств бетона конструкций неразрушающими методами не рассматриваются. Основная причина этого – отсутствие апробированных методик определения упругодеформативных показателей бетона конструкций и соответственно адаптированных к такого рода методикам приборных средств испытаний.

Возможной основой для решения указанной задачи может служить методика мультиволнового акустического контроля бетона. Заметим, что вопросы совместного использования оценки физико-механических свойств бетона акустических волн различных типов не нашли адекватного отражения в действующих нормативах. Ни старой редакцией ГОСТ 17624–87, ни новой ГОСТ 17624–2012 [1], ни СТБ EN 13791–2012 [2] не регламентируется тип используемой волны зондирующего бетон импульса. Фактически же во всех без исключения существующих приборах ультразвукового контроля прочности бетона в качестве информационного параметра

используется скорость/время распространения импульса только продольной волны.

Мультиволновой контроль бетона в конструкциях

Существенное преимущество мультиволнового ультразвукового контроля заключается в том, что совместная интерпретация параметров прохождения волн различных типов позволяет получать информацию об упругих параметрах бетона. Для однородной изотропной среды известны уравнения, позволяющие по соотношению скоростей распространения продольной и поперечной волн рассчитать упругие модули [3, 4]:

$$v_d = \frac{0,5 - \left(\frac{v_T}{v_L}\right)^2}{1 - \left(\frac{v_T}{v_L}\right)^2}; \quad (1)$$

$$E_d = \frac{v_L^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)^2}{1 - \nu}; \quad (2)$$

$$v_R = \frac{0,85 + 1,12v_d}{1 + v_d}, \quad (3)$$

где v_d – динамический коэффициент Пуассона; E_d – динамический модуль Юнга; v_T , v_L , v_R – скорость распространения поперечной, продольной и поверхностной упругой волны.

Находящиеся в обращении типовые приборы ультразвукового контроля не дают возмож-

ности выполнить оценку скорости распространения поперечной волны. Одна из основных причин затруднений обусловлена тем, что используемые одинарные электроакустические преобразователи (ЭАП) не позволяют отдельно излучать и принимать только какой-либо один тип волны, что, в свою очередь, связано со значительной реверберацией ультразвуковых колебаний в самом преобразователе – излучающем и приемном. При этом за время реверберации может происходить многократная смена поляризации вектора колебаний протектора излучателя, а в приемном преобразователе – взаимная трансформация и смешивание всех принятых колебаний. Характер реверберации во многом случаен: реверберационные процессы экземпляров преобразователей даже одного типа могут значительно отличаться. Одинарные ЭАП с точечным акустическим контактом практически не обладают пространственной селективностью, что исключает использование разницы в пространственной локализации волновых импульсов [5, 6]. В то же время энергетические показатели импульса волны Релея позволяют осуществить его селективный прием с использованием типовых приборных средств испытаний.

Методика селекции волновых импульсов

Если рассматривать только геометрический эффект рассеивания энергии волны, не принимая во внимание тепловые потери мощности и потери на рассеяние на неоднородностях и дефектах, то соотношение мощностей сигналов акустического импульса продольной подповерхностной волны Q_L описывается выражением

$$\frac{Q_{L,s2}}{Q_{L,s1}} = \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^2, \quad (4)$$

где s_1, s_2 – базы прозвучивания.

Для импульса волны Релея соотношение мощностей Q_R принимает вид

$$\frac{Q_{R,s2}}{Q_{R,s1}} = \frac{s_1}{s_2}. \quad (5)$$

Соответственно для амплитуд сигналов $A_{L,s}, A_{R,s}$ принятых импульсов справедливы выражения:

$$A_{L,s2} = A_{L,s1} \frac{s_1}{s_2}; \quad (6)$$

$$A_{R,s2} = A_{R,s1} \sqrt{\frac{s_1}{s_2}}; \quad (7)$$

$$\frac{A_{R,s2}}{A_{L,s2}} = A^* \sqrt{s^*}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что по мере увеличения базы измерения соотношение амплитуд импульсов волны Релея и продольной подповерхностной волны будет возрастать прямо пропорционально квадратному корню из относительной базы прозвучивания s^* . Это означает, что определение скорости импульса волны Релея эффективно на больших базах прозвучивания, так как в данном случае сигнал волны Релея легко отличить от сигналов других типов волн, а большая база позволяет если не устранить, то ослабить влияние на результат измерений реверберационных эффектов. Временные диаграммы акустических импульсов на расстоянии 150 мм от точки возбуждения в плоскости, перпендикулярной поверхности испытуемого образца, полученные моделированием распространения упругих волн методом конечных элементов [6], показаны на рис. 1.

Обозначению L соответствует импульс продольной волны, первое вступление импульса волны Релея обозначено R . Первое вступление этого типа колебаний, обусловленное волной Релея, имеет фазу, противоположную фазе импульса продольной волны, и достигает в амплитуде $1,7 \cdot 10^{-10}$ м, что больше чем на порядок превышает уровень первого вступления продольной волны ($1 \cdot 10^{-11}$ м). Ярко выражена поверхностная локализация волны Релея – на глубине 1,3 см наблюдаются (рис. 1) снижение ее интенсивности и изменение фазы колебаний. Принимая во внимание, что импульс продольной волны существующих ультразвуковых приборов надежно регистрируется на расстоянии 15–25 см от точки возбуждения и то, что затухание мощности волны Релея прямо пропорционально расстоянию от точки возбуждения, можно рассчитывать, что ее импульс будет надежно регистрироваться обычными приборами ультразвукового контроля на расстоянии порядка 1,5–2,0 м от точки возбуждения.

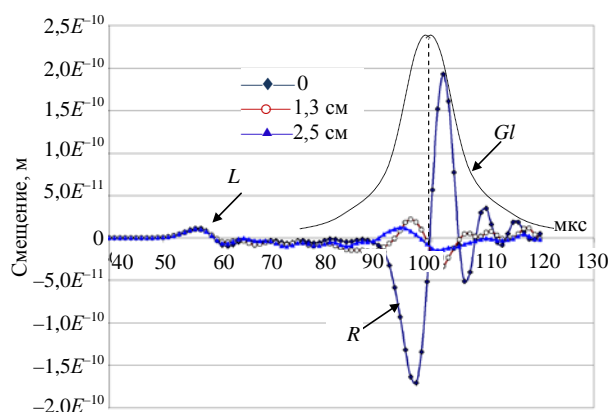


Рис. 1. Временные диаграммы импульсов смещения узлов конечно-элементной модели в направлении, нормальном к поверхности, в точках на расстоянии 150 мм от точки возбуждения нормальным к поверхности импульсом:

L – импульс, инициированный продольной подповерхностной волной; *R* – импульс волны Релея; *Gl* – колоколообразная огибающая импульса волны Релея; длительность инициирующего полусинусоидального импульса давления – 7 мкс; амплитуда силового воздействия – 1 Н

Fig. 1. Timing diagram for pulses of node displacement within finite element model in the direction which is orthogonal to the surface, at the points which are located at the distance 150 mm from a feeding point launched

by orthogonal-to-surface pulse: *L* – pulse initiated by longitudinal subsurface wave; *R* – Rayleigh wave pulse; *Gl* – bell-shaped envelope of Rayleigh wave pulse; duration of initiating pressure for sine half-wave pulse – 7 μs; power action amplitude – 1 N

Экспериментальное исследование процесса распространения волн зондирующего ультразвукового импульса продольной волны и волны Релея в крупноразмерном бетонном образце на больших базах прозвучивания

Контроль протяженных бетонных и железобетонных конструкций удобно производить при одностороннем доступе к поверхности, когда инициирующий и приемный преобразователи устанавливаются на одной стороне (грани) конструкции [7, 8]. Поэтому метод так называемого поверхностного прозвучивания, регламентируемый [1], получил в практике ультразвукового контроля прочности бетона наибольшее распространение, и вполне резонно использовать его и для мультиволнового контроля.

Начальный участок временной диаграммы принятого ультразвукового импульса, прошедшего через бетон, для случая его поверх-

ностного прозвучивания в натуральных условиях испытаний приведен на рис. 2. Кривая *a* соответствует сигналу, полученному при максимальном усилении, *b* – при 30-кратном его ослаблении аттенуатором на входе приемного тракта прибора. Импульсу продольной волны на рис. 2 соответствуют около трех-четырёх периодов колебаний в интервале времени 85–130 мкс.

Спецификой ультразвукового контроля бетона является использование волн, частота которых лежит в диапазоне 35–100 кГц. Соответственно при типичной скорости распространения импульса ультразвуковой продольной волны около $4000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ длина волны колебаний лежит в пределах от 4 до 11 см. При длине волны 8 см пространственная длительность импульса в бетоне составляет 30–35 см, заполняя собой больше половины базы измерения к моменту приема первого его вступления.

Значительная колебательность диаграммы на рис. 2, в отличие от поведения идеализированной модели на рис. 1, обусловлена реверберационными процессами в использованных ЭАП. Поскольку скорости распространения поперечной *SH*-волны и волны Релея примерно в два раза меньше скорости продольной волны, начальные участки импульсов этих волн будут накладываться на «концовку» импульса продольной волны, что и видно на рис. 2 в области временных отметок 120–130 мкс.

При меньших базах происходит более «плотное» наложение импульсов, что затрудняет их временную селекцию. Надежно разделить волновые составляющие возможно, используя большие базы прозвучивания и производя селекцию волновых составляющих по времени либо используя дополнительные отличительные признаки, в частности разницу в уровне сигналов.

При инициировании колебаний нормальным к поверхности силовым воздействием интенсивность продольной волны в направлении вдоль контролируемой поверхности минимальна и сильно зависит от характера акустического контакта и коэффициента Пуассона материала [6]. Несмотря на это, данный тип волн является единственным используемым в настоящее время для контроля физико-механических параметров бетона, поскольку регистрация вре-

мени/скорости распространения данного типа импульса имеет самую простую техническую реализацию.

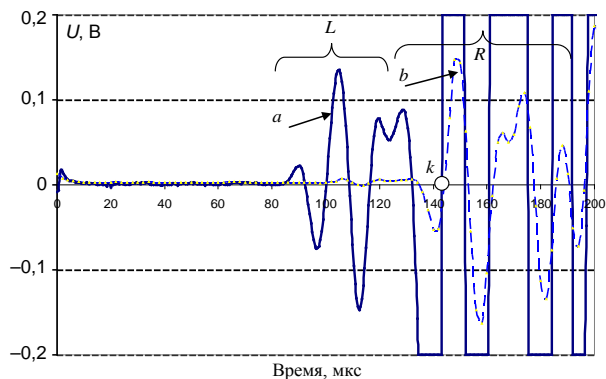


Рис. 2. Временная диаграмма принятого ультразвукового импульса: *L* – импульс продольной волны; *R* – начальная часть импульса волны Релея; *k* – момент регистрации импульса волны Релея; база измерения – 50 см; частота – 55 кГц (направление вектора колебаний протектора нормальное к поверхности бетона)

Fig. 2. Timing diagram for received ultrasonic pulse: *L* – pulse of longitudinal wave; *R* – initial pulse part of Rayleigh wave; *k* – pulse registration moment of Rayleigh wave; measuring database – 50 cm; frequency – 55 kHz (vector direction of protector oscillation which is orthogonal to concrete surface)

Для увеличения амплитуды колебаний продольной подповерхностной волны вектор возбуждения ориентируют в направлении распространения волны – вдоль поверхности. Поскольку продольная волна по мере распространения вовлекает в колебательный процесс все больший объем материала, передавая ему энергию иницирующего импульса, ее интенсивность по мере удаления от точки возбуждения снижается – так называемое геометрическое рассеивание. Для материала без потерь мощность колебаний в точке измерения будет обратно пропорциональна квадрату расстояния от точки возбуждения.

При нормальном к поверхности векторе возбуждения максимум интенсивности поперечной волны наблюдается в направлении около 50° от нормали. Из всех типов объемных волн на долю поперечной волны приходится наибольшая энергия. По данному показателю поперечные волны представляют интерес в качестве зондирующего сигнала. Именно этот тип волны используется в ультразвуковых дефектоскопах-томографах бетона [9, 10], применяе-

мых для обнаружения дефектов сплошности бетонного массива. Геометрическое рассеивание энергии поперечной волны также прямо пропорционально квадрату расстояния от источника.

Волна Релея распространяется только вдоль поверхности массива, захватывая приповерхностный слой материала. Ее уровень сильно зависит от состояния поверхности (неровностей, неоднородных включений). Так как волна Релея вовлекает в колебательный процесс слой материала постоянной толщины, ее затухание будет заметно меньше, чем у других типов волн; геометрическое рассеивание энергии волны Релея прямо пропорционально расстоянию от источника возбуждения.

Для проверки возможности регистрации импульса поверхностной волны и оценки метрологических показателей методики измерений выполнена серия ультразвуковых измерений на натурном крупноразмерном образце. Общий вид испытательного образца и использованное оборудование приведены на рис. 3, характеристические размеры образца – на рис. 4 и в табл. 1.

Для оценки влияния на метрологические показатели типа акустического контакта измерения проводили тремя сериями, в каждой из которых меняли тип контакта ЭАП с поверхностью бетона. В серии ВВ оба преобразователя устанавливались без концентраторов через контактную смазку. В серии ВТ приемный ЭАП устанавливался через контактную смазку, излучающий – с сухим точечным контактом (СТК), с концентратором. В серии ТТ оба ЭАП использовались с СТК. Измерения в каждой серии производили при неизменной позиции приемного преобразователя в точке с координатами *X*, *Y*. Координата *X* излучателя менялась ступенчато с шагом 25 см. Минимальная база измерения составляла 25 см, максимальная – 175 см. В испытаниях использовали оригинальные ЭАП разработки НИЛ ПГС с основной модой резонансной частоты 75 кГц. Характер основного возбуждающего силового воздействия – нормальный к поверхности. Временные диаграммы акустических сигналов на базах измерения 25 и 175 см для серии ВВ приведены на рис. 5, 6.

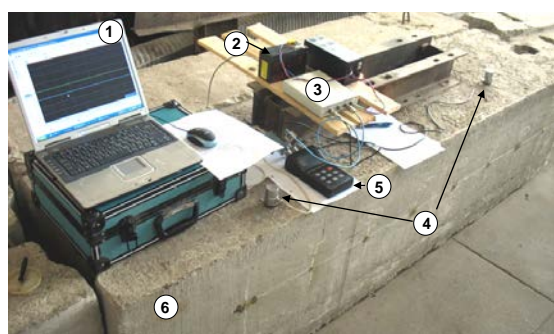


Рис. 3. Используемое измерительное оборудование:
 1 – Notebook с программой регистрации акустических сигналов;
 2 – аккумулятор источника питания аналого-цифрового преобразователя;
 3 – аналого-цифровой преобразователь (цифровой осциллограф) В-421;
 4 – излучающий и приемный электроакустические преобразователи;
 5 – измеритель времени распространения ультразвукового импульса «Пульсар-1.2» с разветвителем сигналов;
 6 – бетонный образец с разметкой точек установки электроакустического преобразователя

Fig. 3. Used measuring devices: 1 – Notebook with software for acoustic signal registration;
 2 – accumulator of power supply source for analog-to-digital converter;
 3 – analog-to-digital converter (digital oscillograph) В-421;
 4 – transmitting and receiving electroacoustic transducers;
 5 – “Pulsar-1.2” timing device for ultrasonic pulse propagation with signal splitter;
 6 – concrete specimen with benchmarking for setting-up of electroacoustic transducer

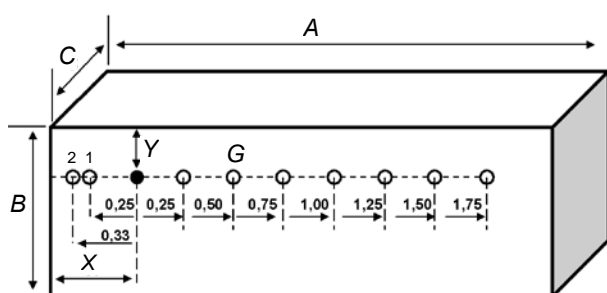


Рис. 4. Схема установки ультразвуковых преобразователей на испытательном бетонном образце

Fig. 4. Scheme for setting-up ultrasonic transducers on testing concrete specimen

Сопоставляя диаграммы рис. 5, 1 и 2, можно констатировать качественное сходство сигналов. Их отличие заключается в значительной временной апертуре реальных акустических сигналов, обусловленной главным образом выраженным резонансным характером передаточной характеристики приемного и излучающего ЭАП. Причем, судя по периодической смене фазы колебаний, хорошо заметной на диаграмме рис. 6, передаточная частотная характери-

стика «излучающий ЭАП – бетон – приемный ЭАП» имеет несколько (не менее двух) резонансов.

Таблица 1

Характеристические размеры образца
 Characteristic dimensions of specimen

Характеристический размер	Величина, м
A	2,36–2,38
B	0,58–0,60
C	0,59–0,60
X	0,39
Y	0,23

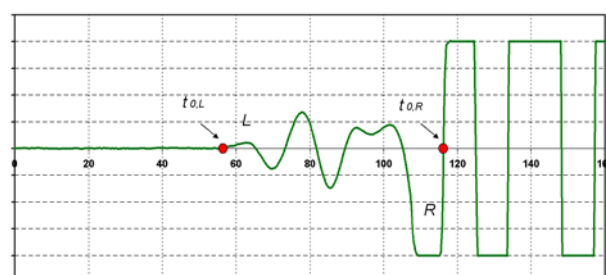


Рис. 5. Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 25 см с использованием вязкого акустического контакта электроакустического преобразователя: L – первое вступление подповерхностной продольной волны; R – первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени; отметки – в микросекундах; вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2»; масштаб – 0,5 В/деление

Fig. 5. Timing diagram of acoustic signal on the basis of 25 cm sonic test while using viscous acoustic contact of electroacoustic transducer: L – first onset of longitudinal subsurface wave; R – first onset of Rayleigh wave pulse; horizontal coordinate corresponds to time axis; markings – in microseconds; vertical coordinate corresponds to pre-amplifier signal level of “Pulsar-1.2” device; scale – 0.5 V per graduated scale unit

Как и ожидалось, характерным для всех диаграмм является значительная амплитуда сигнала волны Релея. На диаграмме рис. 6 первое вступление импульса продольной подповерхностной волны практически полностью маскируется шумами приемного усилителя и визуально не регистрируется, импульс поверхностной волны фиксируется надежно. Это позволяет предположить, что для типовых составов конструкционного бетона измерительная база поверхностного прозвучивания может быть увеличена до 2,0–2,5 м без потери точности оценки времени распространения импульса

и без необходимости применения алгоритмов накопления сигнала и его корреляционной обработки [11].

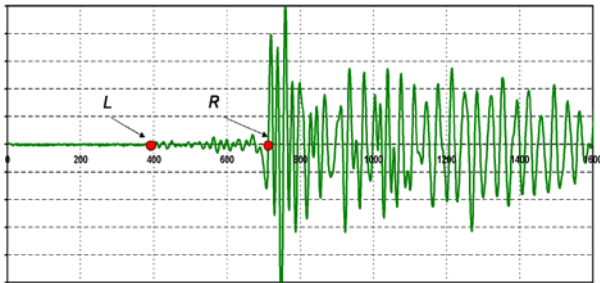


Рис. 6. Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 175 см с использованием вязкого акустического контакта электроакустического преобразователя: L – первое вступление подповерхностной продольной волны; R – первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени; отметки – в микросекундах; вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2»; масштаб – 0,5 В/деление

Fig. 6. Timing diagram of acoustic signal on the basis of 175 cm sonic test while using viscous acoustic contact of electroacoustic transducer: L – first onset of longitudinal subsurface wave; R – first onset of Rayleigh wave pulse; horizontal coordinate corresponds to time axis; markings – in microseconds; vertical coordinate corresponds to pre-amplifier signal level of “Pulsar-1.2” device; scale – 0.5 V per graduated scale unit

Преимуществом использования большой базы прозвучивания является возможность выполнения сплошного контроля поверхности крупноразмерных элементов и конструкций, а не выборочного контроля в отдельных зонах, как это предусмотрено действующими нормативами. Чувствительность параметров волны

Релея к приповерхностным дефектам бетона дает возможность оперативно выявлять участки трещиноватости железобетонной конструкции. Локализация энергии поверхностной волны в слое толщиной $\lambda/2 - \lambda$ позволяет при соответствующем выборе частоты колебаний не учитывать присутствие арматуры. Кроме этого, измерения скорости акустического импульса на большой базе дают возможность снизить влияние структурной неоднородности бетона на статистическую устойчивость оценки скорости импульса, что в перспективе позволит регистрировать проявление эффекта акустической упругости бетона.

Данные для серии ВВ приведены в табл. 2, где $t_{0,L}$, $t_{0,R}$ – момент времени появления первого вступления импульса продольной подповерхностной волны и волны Релея; $\Delta t_{0,L}$, $\Delta t_{0,R}$ – разница текущего и предшествовавшего значений времени распространения; $v_{d,L}$, $v_{d,R}$ – дифференциальная скорость распространения импульсов продольной и поверхностной волн: $v_d = \Delta L / \Delta t_0$; ΔL – шаг профилирования, для всех серий $\Delta L = 0,25$ м.

Характеристическим параметром является дифференциальная скорость распространения акустических импульсов v_d . Момент времени регистрации импульса $t_{0,R}$ (рис. 2, 5) определяли визуально как момент пересечения осциллограммой сигнала оси нулевого значения. Использование дифференциального значения скорости распространения акустического импульса и методики профилирования позволило избежать необходимости калибровки прибора по абсолютным значениям времени распространения.

Таблица 2

Данные регистрации параметров акустических волн серии ВВ
Data on parameter registration for acoustic waves of BB-series

База, см	$t_{0,L}$, мкс	$\Delta t_{0,L}$, мкс	$v_{d,L}$, м/с	$\Delta v/v_L$	$t_{0,R}$, мкс	$\Delta t_{0,R}$, мкс	$v_{d,R}$, м/с	$\Delta v/v_R$
25	56	56	4464	0,000	114,5	105	2381	0,002
50	110	54	4630	-0,037	220	105,5	2370	0,007
75	169	59	4237	0,051	326	106	2358	0,011
100	221	52	4808	-0,077	431	105	2381	0,002
125	284	63	3968	0,111	538	107	2336	0,021
150	338	54	4630	-0,037	641	103	2427	-0,017
175	392	54	4630	-0,037	743	102	2451	-0,027
Коэффициент вариации		0,072	0,069			0,013	0,013	
Среднее значение		56,0	4464,3			104,8	2385,8	
$r =$					0,705			

Относительные отклонения дифференциальной скорости распространения ультразвуковых импульсов продольной подповерхностной волны и волны Релея от средних значений представлены на диаграмме рис. 7.

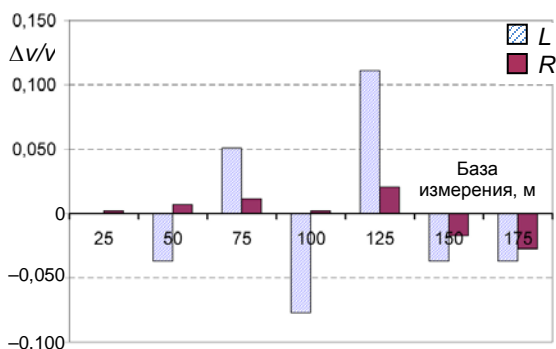


Рис. 7. Зависимость вариации дифференциальной скорости распространения ультразвукового импульса продольной волны и волны Релея от базы измерения для серии ВВ: L – для импульса продольной волны; R – для импульса волны Релея

Fig. 7. Dependence for variation in differential propagation velocity of ultrasonic pulse of longitudinal and Rayleigh waves on measuring base of BB-series: L – for pulse of longitudinal wave; R – for pulse of Rayleigh wave

Следует отметить, что по данному показателю оценки скорости распространения импульса волны Релея заметно превосходят оценки скорости распространения продольной волны: коэффициент вариации скорости импульса волны Релея для серии ВВ равен 0,013, для продольной волны – 0,069. Сильная взаимная корреляция скорости распространения импульсов ($r = 0,705$) рассматриваемых типов волн в серии ВВ может указывать на то, что преобладающим фактором, влияющим на вариацию скорости импульсов, является вариация свойств бетона вдоль линии профилирования.

Для серии ВТ коэффициент корреляции уменьшается до 0,450. Для этой серии преимуще-

ство волны Релея по показателю вариации дифференциального значения скорости сохраняется, хотя их соотношение снижается до двукратного.

Для серии ТТ корреляция практически отсутствует ($r = 0,037$). Характерны «провалы» в регистрации первого вступления импульса продольной волны для базы, начиная с 0,75 м: его амплитудное значение практически неразличимо на фоне шумов. В то же время, несмотря на то что импульс волны Релея регистрировался без затруднений, вариация его скорости возросла почти в три раза и достигла значения 0,036.

Отсутствие взаимной корреляции скорости распространения импульсов указанных типов волн может быть обусловлено преобладающим влиянием нестабильности сухого точечного акустического контакта ЭАП и снижением соотношения сигнал/шум за счет потерь в акустическом контакте. В пользу данного предположения может свидетельствовать монотонный рост коэффициента вариации отклонений скорости по мере поэтапной замены ЭАП с вязким контактом на ЭАП с СТК.

Коэффициенты корреляции одноименных скоростей импульсов в сериях приведены в табл. 3.

Высокие значения коэффициентов корреляции для поверхностной волны указывают на присутствие во всех сериях одного и того же фактора, предположительно – неоднородности бетона по линии профилирования, влияющей на скорость распространения импульса. Для импульса продольной волны значительная случайная погрешность в определении времени распространения, обусловленная низким соотношением сигнал/шум приемного тракта ультразвукового прибора в сериях ВТ и ТТ, замаскировала влияние неоднородности бетона, что выразилось в отсутствии корреляции скорости продольной волны для серий.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции скоростей импульсов
Correlation factor of pulse speed

Серия	Коэффициент корреляции для серии			
	ВТ		ТТ	
	Продольная волна	Поверхностная волна	Продольная волна	Поверхностная волна
ВВ	0,234	0,780	0,048	0,667
ВТ			0,603*	0,671

* Значение получено после статистического отбрасывания неустойчивых данных времени распространения импульса продольной волны в серии ТТ.

ВЫВОДЫ

1. Практическое применение поверхностной волны для целей диагностики состояния бетонного массива методом поверхностного прозвучивания и продольного профилирования на базах 1,5–2,0 м возможно с использованием типовых ультразвуковых электроакустических преобразователей с сухим точечным контактом. Метрологические показатели методики определения скорости распространения ультразвукового импульса поверхностной волны позволяют снизить неопределенность оценки и, как следствие, легко обнаруживать отклонения физико-механических свойств бетона по линии профилирования.

2. В основу методики селекции акустических волн на базах поверхностного прозвучивания бетона более 0,4–0,5 м может быть положено амплитудное разделение составляющих акустического сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624–2012. Введ. 01.01.2014. 16 с.
2. Оценка прочности на сжатие бетона в конструкциях и сборных элементах конструкций: СТБ EN 13791–2012. Минск: Госстандарт, 2012. 18 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
4. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 396 с.
5. Ковалев, А. В. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция / А. В. Ковалев, В. Н. Козлов, А. А. Самокрутов // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29–41.
6. Снежков, Д. Ю. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. Минск: БНТУ, 2006. 218 с.
7. Леонович, С. Н. Результаты мониторинга прочностных характеристик монолитных бетонных плит на основе неразрушающих методов контроля / С. Н. Леонович, Д. Ю. Снежков, В. С. Мулярчик // Строительство и архитектура: материалы XI Междунар. науч.-метод. межвузовского семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь». Брест: БрГТУ, 2004. Ч. 2. С. 115–121.
8. Снежков, Д. Ю. Исследование неравнопрочности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Известия вузов. Строительство. 2009. № 8. С. 108–115.
9. Козлов, В. Н. Контроль бетона ультразвуковым эхо-импульсным томографом с сухим контактом / В. Н. Козлов, А. А. Самокрутов, В. Г. Шевальдыкин // Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 49–51.
10. Ultrasonic Defectoscopy of Concrete by Means of Pulse-Echo Technique / A. A. Samokrutov [et al.] // Proceedings of 8th European Conference on Non-Destructive Tensing. Barcelona, 17–21 June, 2002. 6 p.

11. Качанов, В. К. Проблемы ультразвукового контроля протяженных сложноструктурных изделий с большим затуханием сигналов / В. К. Качанов, И. В. Соколов // Дефектоскопия. 2007. № 8. С. 82–93. DOI. org/10.1134/S1061830907080086.

Поступила 10.06.2016

Подписана в печать 23.08.2016

Опубликована онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. State Standard Concrete 17624–2012. *Ultrasonic Method of Strength Determination*. Moscow, Standartinform, 2014. 16 (in Russian).
2. STB EN 13791–2012 [Standards of the Republic of Belarus]. *Assessment of Concrete Compressive Breaking Strength in Structures and Prefabricated Construction Elements*. Minsk, Gosstandart Publ., 2012. 18 (in Russian).
3. Klyuev V. V., Sosnin F. R., Kovalev A. V., Filinov V. N., Aerts V., Babadzhanov L. S., Badalyan V. G., Blinov N. N., Berger G., Bollen R., Borovikov A. S., Gorkunov E. I., Gurchik A. K., Degterev A. P., Ermolov I. N. (2003) *Non-Destructive Control and Diagnostics*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 656 (in Russian).
4. Golyamin I. P. [ed.] (1979) *Ultrasound. Small Encyclopedia*. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya. 396 (in Russian).
5. Kovalev A. V., Kozlov V. N., Samokrutov A. A. (1990) Pulse Echo-Method While Controlling Concrete. Noises and Spatial Selection. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], (2), 29–41 (in Russian).
6. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2006) *Non-Destructive Control of Concrete in Monolithic Construction: Improvement of Facilities and Methods*. Minsk, Belarusian National Technical University. 218 (in Russian).
7. Leonovich S. N., Snezhkov D. Yu., Muliarchik V. S. (2004) Results of Monitoring for Strength Characteristics in Monolithic Concrete Plates on the Basis of Non-Destructive Control Methods. *Stroitelstvo i Arkhitektura: Materialy XI Mezhdunarodnogo Nauchno-Metodicheskogo Mezhdunarodnogo Seminara "Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitelstve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov Respubliki Belarus"*. [Construction and Architecture. Materials of the XI International Scientific-Methodical Intercollegiate Seminar on "Prospects for the Development of New Technologies in the Construction and Preparation of Engineering Personnel of the Republic of Belarus". Part 2]. Brest, Brest State Technical University, 115–121 (in Russian).
8. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2009) Investigation of Non-Uniform Strength in the Object of Monolithic Construction While Using Complex Non-Destructive Method. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], (8), 108–115 (in Russian).
9. Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. (1998) Concrete Control While Using Ultrasound Echo-Pulse Tomograph with Dry Contact. *Kontrol. Diagnostika* [Control. Diagnostics], (1), 49–51 (in Russian).
10. Samokrutov A. A., Kozlov V. N., Shevaldykin V. G., Meleshko I. A. (2002) Ultrasonic Defectoscopy of Concrete by Means of Pulse-Echo Technique. *Proceedings of 8th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT)*. Barcelona, 17–21 June, 2002.
11. Kachanov V. K., Sokolov I. V. (2007) *Issues of Ultrasonic Testing of Extended Complexly Structured Items with Strong Attenuation of Signals*. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 43 (8), 555–563. DOI. org/10.1134/S1061830907080086.

Received: 10.06.2016

Accepted: 23.08.2016

Published online: 28.07.2017